

АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ ДОБРОТНОСТИ И ЕЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ ПРИ ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННОМ ВЫЯВЛЕНИИ ПОЛОСТЕЙ В МАССИВЕ ПОРОД НА ГРАНИЦЕ «ОБДЕЛКА-ГРУНТ»

В.В. Набатов¹, А.В. Уткина¹

¹ НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: nv4@mail.ru

Аннотация: Одной из важных задач, возникающих при строительстве и эксплуатации подземных выработок, и, в частности, тоннелей метро, является поиск полостей в заобделочном пространстве, который производится с помощью геофизических методов. Довольно часто для решения этой задачи используется георадиолокация, обладающая такими достоинствами как оперативность, непрерывность получаемых данных, высокое разрешение результатов. Однако применение метода ограничено рядом недостатков — сложность интерпретации результатов, влияние помех, обостряющихся при работе в выработке. Снизить влияние этих факторов можно через получение дополнительной информации, вычисляемой с помощью атрибутов. На данных, полученных как на модели, так и на обделках Московского метрополитена, проанализировано поведение такого атрибута как добротность Q . Выявлена такая особенность, как высокая делимость значений Q для случаев наличия полости и ее отсутствия. Однако также выявлены случаи, когда Q нарушение не обнаруживает. Показано, что при анализе компонент (составляющих, по которым рассчитывается Q) — частоты спектрального максимума f_{\max} и обратной ширины спектрального пика в области центральной частоты георадара Δf_{\max}^{-1} — основной вклад в поведение Q вносит Δf_{\max}^{-1} , поведение же f_{\max} фактически хаотично. На основании этого можно делать выводы об эффективности работы с описанными атрибутами, а также о необходимости включения их в комплексы атрибутов.

Ключевые слова: обделка, тоннель, полость, георадиолокация, помехи, добротность, атрибут.

Благодарность: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-05-00341).

Для цитирования: Набатов В. В., Уткина А. В. Анализ поведения добротности и ее составляющих при георадиолокационном выявлении полостей в массиве пород на границе «обделка-грунт» // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6. – С. 142–155. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_6_0_142.

Behavior of the quality factor and its constituents in radar detection of voids at the rock–lining interface

V.V. Nabatov¹, A.V. Utkina¹

¹ National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia, e-mail: nv4@mail.ru

Abstract: One of the critical problems in underground construction and operation, in particular, in subway tunnels, is detection of voids at the rock–lining interface using the geophysical methods. One of the common approaches is the radar detection advantageous for the promptness, continuity of data acquisition and for the high resolution of the results. On the other hand, there are some disadvantages such as complex interpretation of results and the noise interference which is especially acute in underground excavations. It is possible to abate the impact of these factors using additional information obtained from calculations of attributes. This study analyzes the behavior of such attribute as the quality factor Q using the modeling data and in-situ information on the tunnel lining in the Moscow Metro. It is found that the values of Q differ highly in case of a void and when the void is absent. However, Q is incapable sometimes to identify a defect. The analysis of the Q factor components (used to calculate Q), namely, the spectrum maximum frequency f_{\max} and the inverse width of the spectrum peak in the center frequency range of the radar, Δf^{-1} , shows that the major contribution to the behavior of Q is made by Δf^{-1} , while f_{\max} behaves chaotically. On this ground, it is possible to deduce an inference on the efficiency of the mentioned attributes and on the advisability of integrating them in the attribute sets.

Key words: lining, tunnel, void, radar detection, noise, quality factor, attribute.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research, Project No. 20-05-00341.

For citation: Nabatov V. V., Utkina A. V. Behavior of the quality factor and its constituents in radar detection of voids at the rock–lining interface. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(6):142-155. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_6_0_142.

Введение

Полости за обделкой могут возникать из-за широкого спектра причин: некачественный тампонаж на момент строительства, влияние вибраций от передвижающегося по тоннелям состава, влияния строительства вблизи от действующего тоннеля, геологические процессы (как вызванные естественными причинами, так и техногенными). При этом полости могут оказывать существенное влияние на работу тоннеля. Обделка в пределах полости не воспринимает давление со стороны массива пород, что приводит к тому, что нагрузка на обделку перераспределяется с образованием зон с повышенным ее значением. Для тоннелей глубокого заложения подобное распределение напряжений может приводить к деформациям, появлению трещин и последующему разрушению обделки [1,

2]. При небольшой глубине заложения тоннеля и большой протяженности полостей они способны оказывать влияние на окружающую застройку [2; 3]. В некоторых случаях заобделочные полости могут вызывать деформации путевого бетона и таким образом воздействовать на конструкции пути.

Проблему влияния полостей решают с помощью дополнительного тампонажа. Однако для проведения этой процедуры необходимо знать участки тоннеля, где за обделкой присутствуют полости. Фактически речь идет о необходимости определять качество тампонажа и структуру массива пород за преградой, в качестве которой выступает обделка. Подобная задача типична для геофизических методов. Наиболее часто эту задачу решают с помощью сейсмо-

акустического метода Impulse Response (IR) [4], при реализации которого по обделке наносят серию ударов, регистрируя с помощью датчика ее отклик. В случае, если обделка не прижата грунтом, она совершает более свободные колебания, что приводит к более высокоамплитудному и длительному отклику. Проблемой IR является низкая разрешающая способность.

Другим активно используемым методом, обладающим достаточной разрешающей способностью, является георадиолокация [5, 6]. Ее недостатком является трудоемкость интерпретации результатов съемки, что приводит к возможности обследовать только локальные участки тоннелей, а также делает результат зависящим от субъективного решения оператора.

Как проблему трудоемкости интерпретации, так и вопросы достоверности геофизического прогноза можно решать через поиск в зарегистрированном волновом поле значений неких признаков, атрибутов, являющихся результатом обработки зарегистрированной информации. Атрибутами могут быть статистические [7–10], спектральные характеристики [11–14], характеристики формы сигнала и времени существования спектральных максимумов [15–17], кинематические параметры [18], параметры аналитического сигнала [19], характеристики в рамках теории информации [20] и т.п. Подобные признаки далее подвергаются ряду преобразований от применения простейшего порогового правила до использования их в регрессионных моделях и различных методах распознавания образов (кластерный анализ, деревья решений, искусственные нейронные сети и т.п.).

Атрибуты позволяют решать самые различные задачи, как методического, так и практического плана. В сфере георадиолокации с их помощью: объеди-

няют в одну картину результаты разночастотных георадарных измерений [21], картируют трещины [7], выявляют степень загрязнения почвы [22], выявляют малые нарушения в забоях угольных шахт [23]. Однако при этом вопросы применения атрибутивного анализа для оценки состояния заобделочного пространства с помощью георадиолокации разработаны слабо [24, 25].

Основные особенности идентифицирующих сигналов

Для того, чтобы наметить основные пути поиска эффективных атрибутов, способных разделять случаи «есть полость за обделкой» и «нет полости за обделкой» первоначально стоит проанализировать, какие особенности сигналов указывают на наличие полости, подобрать оптимальную предварительную обработку сигнала, вычислить атрибут и провести постобработку его значений. Далее оценить поведение этого атрибута с точки зрения его эффективности.

Основной, идентифицирующей полость, особенностью сигнала при интерпретации является появление на трассах специфического сигнала, так называемого «звона» [26–28]. В качестве причины возникновения этого сигнала часто называют либо множественные переотражения, либо искажение волновой формы сигнала при отражении и прохождении сигнала через среду с высокой проводимостью [29]. Возможно, что работают оба эффекта, поскольку «звоны» наблюдаются и в случаях, когда полость заполнена воздухом [19].

Опираясь на собранный в тоннелях Московского метрополитена материал, можно выделить ряд особенностей «звона». На рис. 1, а представлен пример радарограммы (георадар ОКО-2 АБ-1200), снятой по боковой поверхности тоннеля. Участок со «звonom» представлен в нескольких вариантах обработки и вы-

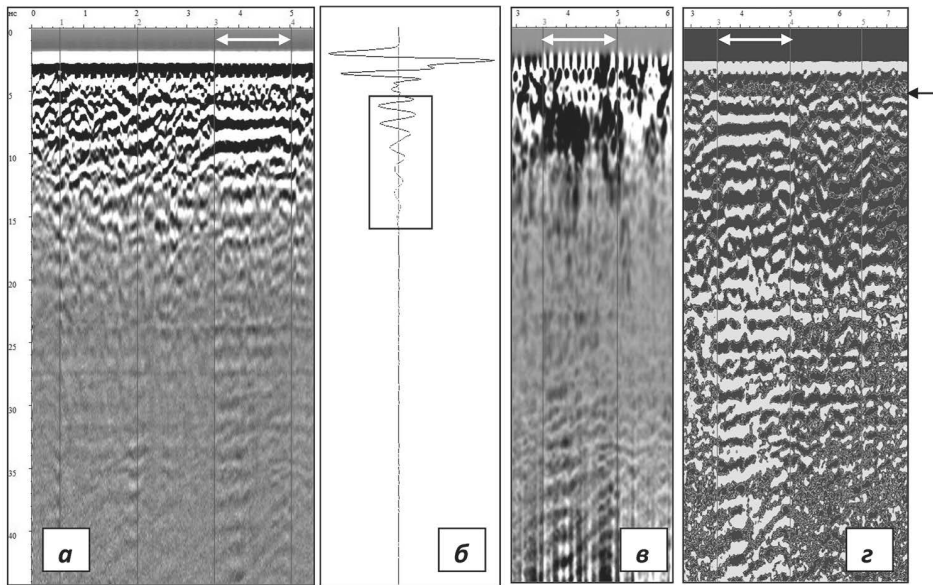


Рис. 1. Пример радарограммы, содержащей участок с выраженными сигналами-идентификаторами: исходная радарограмма (а); трасса в области «звона» (б); участок радарограммы после амплитудного преобразования Гильберта (в); участок радарограммы после выравнивания сигнала и коррекции цветовой шкалы (г)

Fig. 1. Example radarogram containing an area with the pronounced signals-identifies: initial radarogram (a); trace in the 'ringing effect' zone (b); radarogram branch after the Hilbert transform (c); radarogram after smoothing of signal and tonal scale correction (d)

делен на всех изображениях двухсторонней стрелкой.

Первой хорошо заметной особенностью «звона» является его повышенная амплитуда. Это иллюстрирует трасса, взятая в области влияния «звона» (см. рис. 1, б), а также «завоненный» участок радарограммы после амплитудного преобразования Гильберта (АПГ; см. рис. 1, в). Темное пятно на радарограмме показывает повышенные значения сигнала после АПГ.

Также характерной особенностью «звона» является то, что он начинается со времен, на которых должна присутствовать граница «обделка-грунт». Особенно хорошо это видно на рис. 1, в, г. Положение границы «обделка-грунт» показано горизонтальной односторонней стрелкой. Сама граница при этом может не просматриваться из-за влияния «усов» гиперболических осей син-

фазности, образуемых прутами армирования.

Следующая особенность — это высокая длительность «звона» и квазигармонический характер его волновой формы. На необработанной радарограмме «звон» присутствует на небольшом участке в начале трассы, после чего испытывает быстрое спадание амплитуды (этот участок выделен прямоугольным окном на рис. 1, б). Однако в действительности «звон» может занимать всю длину трассы, просто он плохо просматривается из-за ограниченных возможностей визуализации. Это иллюстрирует рис. 1, г, на котором радарограмма подвергнута выравниванию амплитуд (методика выравнивания описана в [19]). Трассы под двухсторонней стрелкой зашумлены «звоном» практически до их конца. В то же время, на соседних участках, несмотря на выравнивание, трассы

имеют небольшие амплитуды. В некоторых случаях «звон» реализуется как хаотическая волновая картина (ХВК) — тип волнового поля, которое может характеризоваться высокими амплитудами, но существенной изменчивостью «звона» как по длине трассы, так и вдоль по профилю.

Очевидно, что присутствие в волновом поле выраженных гармонических компонент должно изменять спектры. Это одно из наиболее перспективных направлений поиска эффективных атрибутов. Изменения в спектре действительно можно обнаружить — спектры трассы со «звоном» имеют более острый пик. Это позволяет выявлять полости по параметру Q , рассчитываемому аналогично тому, как по спектрам сигналов оценивается добротность колебательной системы (1):

$$Q = f_{\max} / \Delta f, \quad (1)$$

где f_{\max} — частота максимума спектра; Δf — ширина резонансного пика, взятого на уровне $h = 0,707$.

Изменения Q в зависимости от качества контакта «грунт-обделка» хорошо выражены при работе на простых объектах (малое время эксплуатации, малая мощность конструкции, невысокая плотность армирования), однако в реальной практике, при работе в эксплуатируемых тоннелях его применение проблематично. Эта статья посвящена анализу проблем обнаружения полостей в заобделочном пространстве и особенностям вычисления атрибута Q и его составляющих, которые были выявлены при исследованиях, проведенных как на объектах с известным расположением полостей, так и в эксплуатируемых тоннелях московского метро.

Методика исследования

Исследование велось с помощью георадара «ОКО-2» антенными блоками с центральной частотой 1200 и 1700 МГц.

Использовались значения накопления от $n = 32$ до $n = 8$. Это связано с тем, что при высоких значениях n на радиogramму все больше начинают влиять регулярные помехи, как воздушные, так и вызванные объектом контроля. Однако при полном отказе от накопления начинают наблюдаться нерегулярные шумовые компоненты.

Исследование производилось в два этапа. На первом этапе работы велись на модельном объекте — плите, еще не собранной станционной конструкции. Толщина плиты 0,15 м. Поскольку монтаж конструкции был еще не окончен, при георадиолокационной съемке можно было наблюдать расположение и характер полостей за плитой. Далее в статье зоны различного контакта будут обозначаться буквами: зоны А и Г — пустота за обделкой, зона В — рыхлый грунт, частично примыкающий к обделке, зона Б — хороший контакт (см. схему на рис. 2, а). Результаты съемки на подобном объекте позволили оценить эффективность выделения полостей по различным атрибутам, а также подобрать оптимальный предварительный граф обработки данных и граф обработки, применяемый после вычисления атрибута. Конкретно в этом исследовании изучалось поведение добротности Q и параметров (составляющих), по которым она рассчитывается — частота спектрального максимума f_{\max} и обратная ширина спектрального пика в области центральной частоты георадара Δf^{-1} . Уровень h , на котором оценивалась обратная ширина, не всегда выбирался в соответствии с правилом $h = 0,707$, в некоторых случаях это значение необходимо было изменять.

На втором этапе производились съемки и оптимизация обработки добротности и ее составляющих на реальной обделке действующего тоннеля Московского метрополитена. Толщина об-

делки 0,25 м. Решение о том, присутствует ли за обделкой полость, принималось на основании выявления полостей сейсмоакустическим методом (использовался метод IR).

Результаты исследований и их анализ

На рис. 2, а представлена схема, описывающая расположение полостей для модельного случая (использована антенна 1700 МГц). На рис. 2, б дана радарограмма, снятая на модельной плите. Здесь можно выделить три волновых картины, которые можно связать с воздействием полостей. Они так же обозначены буквами А, В, Г. Причем волновые картины А и Г реализовались как «звон», а волновая картина В как ХВК. Между описываемыми участками находится участок, соответствующий зоне Б. Он не содержит сигналов-идентификаторов плохого контакта.

По полученным данным было рассчитано значение добротности Q для уровня $h = 0,707$, а также ее составляющих f_{\max} и Δf^{-1} . Выравнивание для этих

атрибутов не применялось, поскольку оно слишком существенно искажает спектр сигнала. Результаты расчетов представлены на рис. 3 в виде графиков $Q(N)$, $f_{\max}(N)$ и $\Delta f^{-1}(N)$, описывающих изменение атрибута вдоль по профилю, где N — это номер георадиолокационной трассы. На графики нанесены зоны А-Г, описанные выше.

Анализируя график $Q(N)$, можно отметить высокую разделимость случаев плохого (зона Г) и хорошего контакта (зона Б). Гистограммы значений Q для этих двух случаев практически не пересекаются (см. рис. 4, группа более высоких значений Q соответствует зоне Г, т.е. плохому контакту). Многие другие атрибуты, получаемые при решении описываемой задачи, имеют существенно пересекающиеся распределения. Однако случаи Б и В практически неразделимы. Другими словами параметр добротности плохо видит ХВК и условия частичного контакта. Этот результат можно объяснить тем, что ХВК формирует «звоноподобные» сигналы небольшой длины, занимающие короткий участок

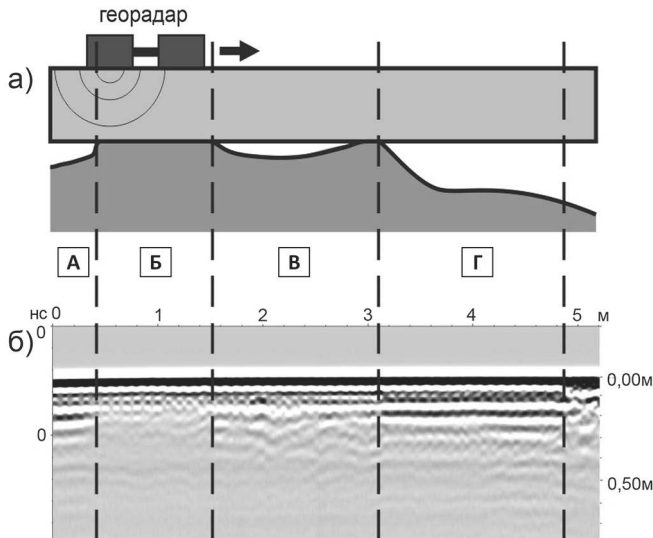


Рис. 2. Результаты измерений на модельном объекте (АВ1700): схема расположения полостей (а); радарограмма, полученная при съемке (б)

Fig. 2. Model measurement data (object AB1700): layout of voids (a); survey radarogram (b)

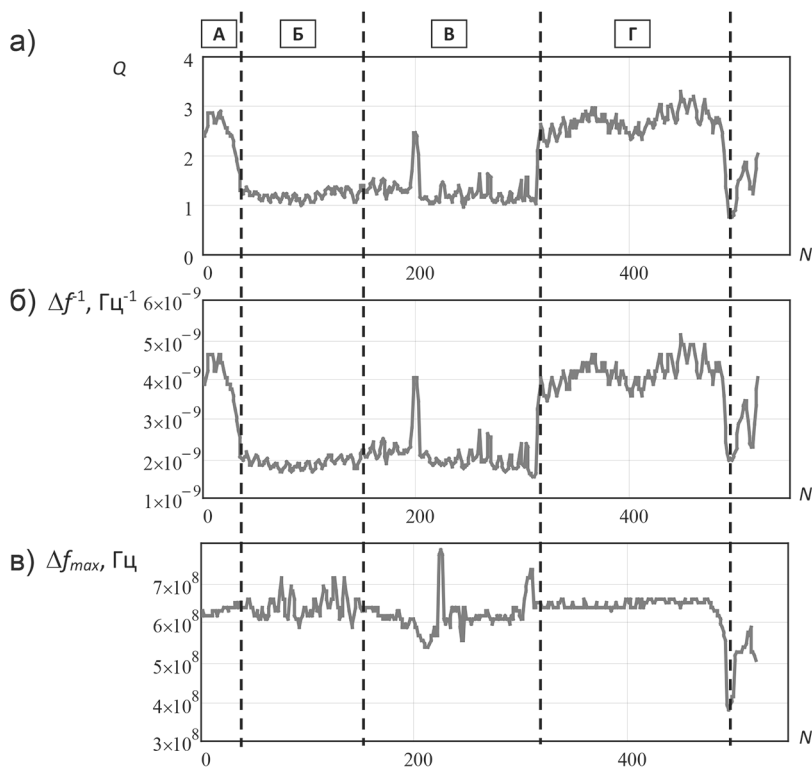


Рис. 3. Результаты вычисления атрибутов для модельного случая: $Q(N)$ (а); $\Delta f^{-1}(N)$ (б); $f_{\max}(N)$ (в)
 Fig. 3. Calculated attribute in model case: $Q(N)$ (a); $\Delta f^{-1}(N)$ (b); $f_{\max}(N)$ (v)

трассы и не способные существенно повлиять на спектр сигнала.

Также при работе с добротностью было выяснено, что на самом деле основной вклад в выявляемость разуплотнения за обделкой производит не сама добротность, а одна из ее составляющих. На графиках рис. 3 хорошо вид-

но, что $\Delta f^{-1}(N)$ фактически повторяет поведение графика добротности $Q(N)$, а $f_{\max}(N)$ показывает случайные отклонения от своего среднего значения. Коэффициент корреляции для пары «добротность Q » – «частота спектрального максимума f_{\max} » составил $R(Q, f_{\max}) = 0,18$. В то время как корреляция для

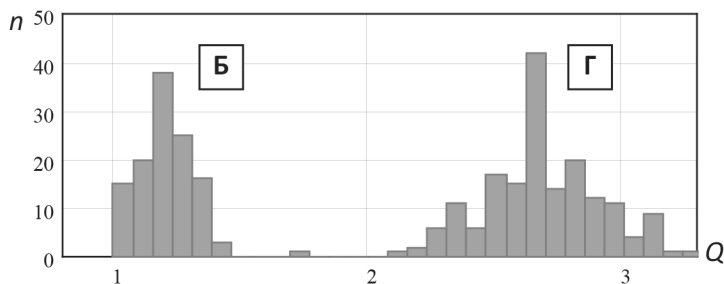


Рис. 4. Гистограммы значений добротности, полученные в зонах Б и Г; n – количество наблюдаемых случаев для конкретного разряда

Fig. 4. Histogram of quality factor values in zones B and G; n – number of events observed in specific classes

пары «добротность Q » – «обратная ширина спектрального максимума Δf^{-1} » составила $R(Q, \Delta f^{-1}) = 0,99$. Таким образом, детерминации для этих случаев $R^2(Q, f_{\max}) = 0,032$ и $R^2(Q, \Delta f^{-1}) = 0,98$. Это означает, что дисперсия добротности Q на 98% определяется такой ее составляющей, как Δf^{-1} и практически не зависит от f_{\max} .

Если в последующем производить комплексирование атрибутов с применением методов принятия решения «есть полость за обделкой», «нет полости за обделкой», включение добротности Q , поведение которой зашумлено составляющей с низкой эффективностью f_{\max} , скорее всего, сделает комплекс менее помехоустойчивым. Более обоснованным будет включение в него обратной ширины спектрального максимума Δf^{-1} или просто ширины Δf .

Дальнейшая работа была проведена в действующих тоннелях Московского метрополитена (использована антенна

1200 МГц). Один из результатов вычисления атрибутов представлен на рис. 5. Пунктирными прямоугольниками показано расположение полостей, полученное по результатам IR. Можно отметить, что атрибут $\Delta f^{-1}(N)$ способен указывать на расположение полостей (см. рис. 5, а), хотя по сравнению с модельным вариантом его график стал более изрезанным. Функция f_{\max} как и с модельным случаем ведет себя хаотично (см. рис. 5, б) и выявлять полости не позволяет.

Первичные опробования $\Delta f^{-1}(N)$ велись с уровнем $h = 0,707$, однако они приводили к сильно зашумленному результату. Повышение уровня до $h = 0,9$ существенно улучшило ситуацию. Объяснить это можно с помощью примеров спектров, представленных на рис. 6 (оба спектра взяты из тех частей радарограмм, где присутствует «звон»). В случае работы на эксплуатируемой обделке на спектр начинает воздействовать

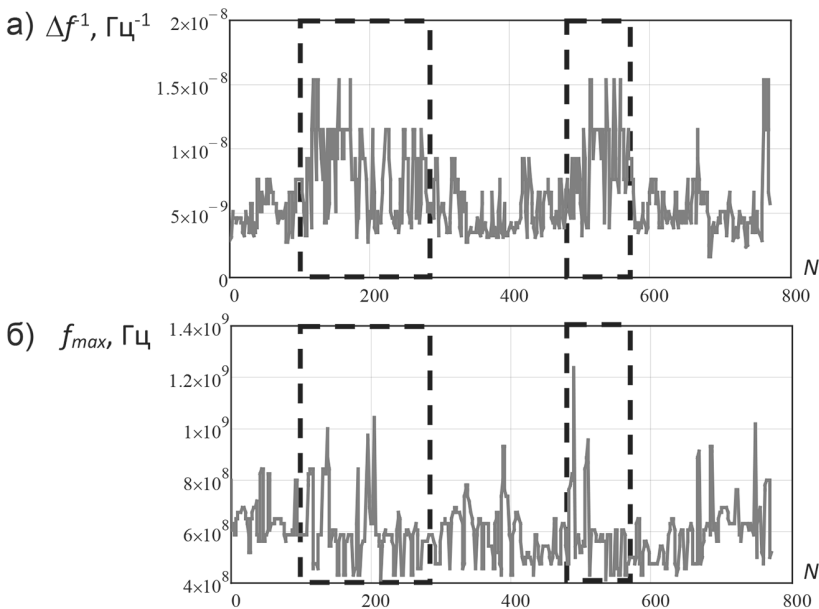


Рис. 5. Результаты вычисления атрибутов для случая обделки эксплуатируемого тоннеля: $\Delta f^{-1}(N)$ (а); $f_{\max}(N)$ (б)

Fig. 5. Calculated attributes for operating tunnel lining: $\Delta f^{-1}(N)$ (a); $f_{\max}(N)$ (b)

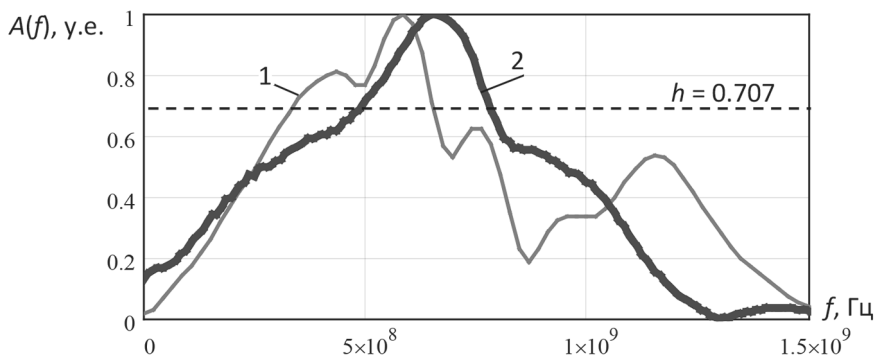


Рис. 6. Примеры спектров: 1 – съемки на модели, 2 – съемки на обделке действующего тоннеля
 Fig. 6. Example survey spectra: 1 – model; 2 – operating tunnel lining

большее количество помеховых факторов – трещины, вариации электрических свойств объекта контроля в результате старения конструкции, помехи от объектов внутри тоннеля, влияние армирования. Это приводит к тому, что спектр начинает вести себя более хаотично. В нем появляются и становятся более выраженными дополнительные спектральные пики, делающие его шире (такая ситуация просматривается на рис. 6, где уровень $h = 0,707$ дан пунктирной линией). Оказываясь под влиянием нескольких резонансных эффектов, ширина центрального пика начинает вести себя случайно. Если же оценивать ширину вблизи самого большого пика, эти факторы становятся менее выраженными.

Анализ поведения составляющих добротности в случае работы на обделке действующего тоннеля дал схожие результаты с модельным вариантом. Визуальное подобие графиков $Q(N)$, $\Delta f^{-1}(N)$, $f_{\max}(N)$ из-за помеховых факторов анализировать сложно, однако оно хорошо просматривается по диаграммам рассеяния (см. рис. 7). Можно отметить, что облако, образованное парой Q и f_{\max} более широкое, то есть обладающее существенно меньшей соизменчивостью, чем облако, образованное парой Q и Δf^{-1} .

Коэффициенты корреляции для этих случаев: $R(Q, f_{\max}) = 0,36$ и $R(Q, \Delta f^{-1}) = 0,909$. Это дает детерминации: $R^2(Q, f_{\max}) = 0,13$ и $R^2(Q, \Delta f^{-1}) = 0,83$. Т.е. дисперсия Q на 83% объясняется влия-

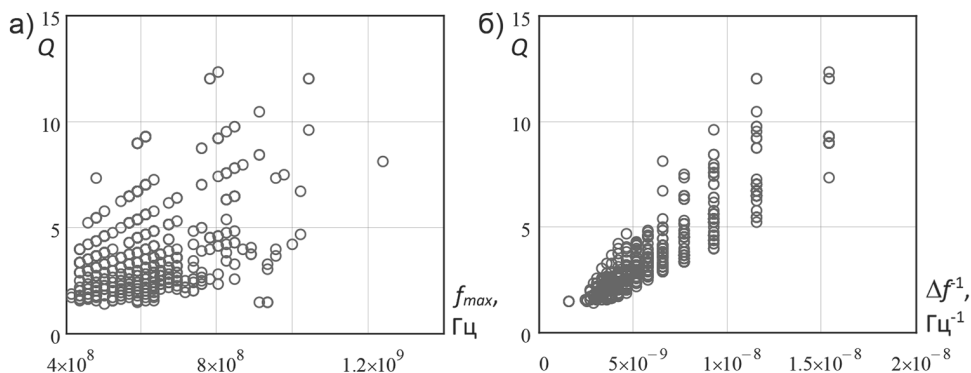


Рис. 7. Диаграммы рассеяния: Q от f_{\max} (а); Q от Δf^{-1} (б)

Fig. 7. Scattering diagrams: Q from f_{\max} (a); Q from Δf^{-1} (b)

нием Δf^{-1} и всего лишь на 13% влиянием f_{\max} . Понижение значения объясненной дисперсии для пары Q и Δf^{-1} легко объяснить влиянием помеховых факторов, которые обострились при переходе на эксплуатируемый объект.

В целом высокое значение коэффициента корреляции говорит о том, что для эффективного комплекса атрибутов желательно использовать какой-то один из описываемых атрибутов — Q либо Δf^{-1} , опираясь на их корреляцию с другими атрибутами. В противном случае комплекс будет перегружаться однотипной информацией. При этом f_{\max} не указывает на полости — его добавление в комплекс нежелательно.

Выводы

По результатам исследования поведения добротности Q и ее составляющих, таких как частота спектрального максимума f_{\max} и его обратная ширина Δf^{-1} , были выявлены следующие особенности:

1. Для атрибутов Q и Δf^{-1} характерна высокая контрастность значений для случаев «есть полость за обделкой» и «отсутствует полость за обделкой». В слу-

чае если наблюдается хаотическая волновая картина, характерная для частичного контакта, эти атрибуты могут не справляться с выявлением нарушения.

2. При вычислении Q либо Δf^{-1} нежелательно использовать общепринятое решение, когда ширина спектрального пика берется на уровне $h = 0,707$, что связано с изрезанностью спектральной функции. Предпочтительно искать оптимальное, обычно более высокое значение этого уровня.

3. При создании комплекса атрибутов в них нежелательно включать частоту спектрального пика f_{\max} . Также в такие комплексы нежелательно включать сразу Q и Δf^{-1} , поскольку между этими атрибутами наблюдается высокое значение коэффициента корреляции: $R(Q, \Delta f^{-1}) = 0,909$ для случая измерения в действующем тоннеле и $R(Q, \Delta f^{-1}) = 0,99$ для случая работы на модели. Использование Q менее предпочтительно, поскольку оно испытывает помеховое влияние составляющей f_{\max} .

Авторы выражают благодарность П.В. Николенко и Р.М. Гайсину за помощь в проведении полевых измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jifei W., Hongwei H., Xiongyao X., Bobet A. Void-induced liner deformation and stress redistribution // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2014, vol. 40, pp. 263–276. DOI: 10.1016/j.tust.2013.10.008.

2. Запрудин А. Г. Обоснование инженерных решений в системе защиты городской среды от воздействия горных работ при строительстве метрополитена // *Известия вузов. Горный журнал*. — 2008. — № 7. — С. 11–18.

3. Писецкий В. Б., Власов С. В., Зудилин А. Э., Самсонов В. И., Шинкарьюк В. А. Оперезающий прогноз устойчивости горного массива на основе метода 3D-3C-сейсмолокации в процессе проходки транспортных тоннелей // *Известия вузов. Горный журнал*. — 2012. — № 3. — С. 130–138.

4. Davis A. G., Lim M. K., Petersen C. G. Rapid and economical evaluation of concrete tunnel linings // *NDT&E International*. 2005, vol. 38, pp. 181–186. DOI: 10.1016/j.ndteint.2004.03.011.

5. Hai Liu, Xiongyao Xie, Motoyuki Sato Accurate thickness estimation of a backfill grouting layer behind shield tunnel lining by CMP measurement using GPR / 14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR). 2012. DOI: 10.1109/ICGPR.2012.6254848.

6. Chuan Li, Meng-Juan Lia, Yong-Gui Zhao, Hao Liu, Zhou Wan, Jiang-Chun Xu, Xiao-Ping Xu, Yan Chen, Bin Wang Layer recognition and thickness evaluation of tunnel lining based on ground penetrating radar measurements // Journal of Applied Geophysics. 2011, vol. 73, pp. 45–48. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2010.11.004.

7. Forte E., Pipan M., Casabianca D., Di C. R., Riva A. Imaging and characterization of a carbonate hydrocarbon reservoir analogue using GPR attributes // Journal of Applied Geophysics. 2012, vol. 81, pp. 76–87.

8. Knight R., Tercier P., Jol H. The role of ground penetrating radar and geostatistics in reservoir description // The Leading Edge. 1997, vol. 16, pp. 1576–1581. DOI: 10.1190/1.1437526.

9. Федорова Л. Л., Соколов К. О., Куляндин Г. А. Георадиолокационные исследования горно-геологических условий дражных полигонов // Горный журнал. — 2015. — № 4. — С. 10–14. DOI: 10.17580/gzh.2015.04.02.

10. Shkuratnik V. L., Nikolenko P. V., Kormnov A. A. Ultrasonic correlation logging for roof rock structure diagnostics // Journal of Mining Science. 2015, vol. 51, no. 3, pp. 456–461. DOI: 10.1134/S1062739115030059.

11. Chaudhary M. Effectiveness of impact echo testing in detecting flaws in prestressed concrete slabs // Construction and Building Materials. 2013, vol. 47, pp. 753–759. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.021.

12. Aggelis D. G., Shiotani T., Kasai K. Evaluation of grouting in tunnel lining using impact-echo // Tunnelling and Underground Space Technology. 2008, vol. 23, pp. 629–637. DOI: 10.1016/j.tust.2007.12.001.

13. Соколов К. О. Частотно-временное представление георадиолокационных разрезов на основе непрерывного вейвлет-преобразования // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2014. — № 2. — С. 77–81.

14. Shkuratnik V. L., Nikolenko P. V., Koshelev A. E. Spectral characteristics of acoustic emission in loaded coal specimens for failure prediction // Journal of Mining Science. 2017, vol. 53, no. 5, pp. 818–823. DOI: 10.1134/S1062739117052825.

15. Aggelis D. G., Shiotani T., Kasai K. Evaluation of grouting in tunnel lining using impact-echo // Tunnelling and Underground Space Technology. 2008, vol. 23, pp. 629–637. DOI: 10.1016/j.tust.2007.12.001.

16. Song K., Cho G. Bonding state evaluation of tunnel shotcrete applied on to hard rocks using the impact-echo method // NDT&E International. 2009, vol. 42, pp. 487–500. DOI: 10.1016/j.ndteint.2009.02.007.

17. Verma A. K., Soumi Chaki, Aurobinda Routray, Mohanty W. K., Mamata Jenamani. Quantification of sand fraction from seismic attributes using Neuro-Fuzzy approach // Journal of Applied Geophysics. 2014, vol. 111, pp. 141–155. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2014.10.005.

18. Денисов Р. Р., Капустин В. В. Обработка георадарных данных в автоматическом режиме // Геофизика. — 2010. — № 4. — С. 76–80.

19. Набатов В. В., Вознесенский А. С. Георадиолокационное обнаружение полостей в заобделочном пространстве тоннелей метрополитенов // Горный журнал. — 2015. — № 2. — С. 15–20. DOI: 10.17580/gzh.2015.02.03.

20. Nabatov V. V. Information entropy as an identifier in rock mass structure determination using low-frequency radars // Journal of Mining Science. 2017, vol. 53, no. 2, pp. 190–200. DOI: 10.1134/S1062739117022295.

21. Lu G., Zhao W., Forte E., Tian G., Li Y., Pipan M. Multi-frequency and multi-attribute GPR data fusion based on 2-D wavelet transform // Measurement. 2020, vol. 166, article 108243. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.108243

22. Liu Z., Li J., Liu Y., Liu C., Li C., Zhou D. Analyzing the behavior of GPR wave propagation in zinc contaminated soil combining the dielectric properties – experimental study // Acta Geophysica. 2021, vol. 69, pp. 483–495. DOI: 10.1007/s11600-021-00552-2.

23. Fan C., Zhi-Rong Z., Yun-Fei D., Yu B., Chang-Qing X., Xiao-Feng J. Correction of seismic attribute-based small-structure prediction errors using GPR data. A case study of the

Shuguang Coal Mine, Shanxi // *Applied Geophysics*. 2020, vol. 17, no. 4, pp. 489–500. DOI: 10.1007/s11770-020-0841-7.


24. Андрианов С. В. Мониторинг состояния заобделочного пространства горных выработок методом георадиолокации // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2019. – № 5. – С. 124–132. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-124-132.

25. Peng M., Wang D., Liu L., Shi Z., Shen J., Ma F. Recent advances in the GPR detection of grouting defects behind shield tunnel segments // *Remote Sensing*. 2021, vol. 13, no. 22, article 4596. DOI:10.3390/rs13224596.

26. Mapping voids, debonding, delaminations, moisture, and other defects behind or within tunnel linings. TRB's second Strategic Highway Research Program (SHRP 2) Report S2-R06G-RR-1. 2013, pp. 555. DOI: 10.17226/22609.

27. Вартанов А. З., Ковпак И. В., Титов Н. Е. Геоконтроль при щитовой проходке коллекторов неглубокого заложения // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2005. – № 7. – С. 87–92.

28. Еременко А. В., Зверев Е. О., Клепикова С. М., Монахов В. В. Георадиолокация в присутствии железобетонных конструкций // *Разведка и охрана недр*. – 2004. – № 12. – С. 26–28.

29. Копейкин В. В. Распространение электромагнитных импульсов в подземной среде. URL: <http://www.georadar.ru/articles/article5.php> (дата обращения: 16.01.2022). 

REFERENCES

1. Jifei W., Hongwei H., Xiongyao X., Bobet A. Void-induced liner deformation and stress redistribution. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2014, vol. 40, pp. 263–276. DOI: 10.1016/j.tust.2013.10.008.

2. Zaprudin A. G. Substantiation of engineering solutions in the system of defense of urban surrounding from effect of mining works in metro construction. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2008, no. 7, pp. 11–18. [In Russ].

3. Pisetskiy V. B., Vlasov S. V., Zudilin A. E., Samsonov V. I., Shinkaryuk V. A. Forecast of stability of rock mass on the basis of 3D-3C-seismolocation method in the process of tunneling of transport tunnels. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2012, no. 3, pp. 130–138. [In Russ].

4. Davis A. G., Lim M. K., Petersen C. G. Rapid and economical evaluation of concrete tunnel linings. *NDT&E International*. 2005, vol. 38, pp. 181–186. DOI: 10.1016/j.ndteint.2004.03.011.

5. Hai Liu, Xiongyao Xie, Motoyuki Sato Accurate thickness estimation of a backfill grouting layer behind shield tunnel lining by CMP measurement using GPR. *14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)*. 2012. DOI: 10.1109/ICGPR.2012.6254848.

6. Chuan Li, Meng-Juan Lia, Yong-Gui Zhao, Hao Liu, Zhou Wan, Jiang-Chun Xu, Xiao-Ping Xu, Yan Chen, Bin Wang Layer recognition and thickness evaluation of tunnel lining based on ground penetrating radar measurements. *Journal of Applied Geophysics*. 2011, vol. 73, pp. 45–48. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2010.11.004.

7. Forte E., Pipan M., Casabianca D., Di C. R., Riva A. Imaging and characterization of a carbonate hydrocarbon reservoir analogue using GPR attributes. *Journal of Applied Geophysics*. 2012, vol. 81, pp. 76–87.

8. Knight R., Tercier P., Jol H. The role of ground penetrating radar and geostatistics in reservoir description. *The Leading Edge*. 1997, vol. 16, pp. 1576–1581. DOI: 10.1190/1.1437526.

9. Fedorova L. L., Sokolov K. O., Kulyandin G. A. Georadar exploration of ground conditions in dredge areas. *Gornyi Zhurnal*. 2015, no. 4, pp. 10–14. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2015.04.02.

10. Shkuratnik V. L., Nikolenko P. V., Kormnov A. A. Ultrasonic correlation logging for roof rock structure diagnostics. *Journal of Mining Science*. 2015, vol. 51, no. 3, pp. 456–461. DOI: 10.1134/S1062739115030059.

11. Chaudhary M. Effectiveness of impact echo testing in detecting flaws in prestressed con-

crete slabs. *Construction and Building Materials*. 2013, vol. 47, pp. 753–759. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.021.

12. Aggelis D. G., Shiotani T., Kasai K. Evaluation of grouting in tunnel lining using impact-echo. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2008, vol. 23, pp. 629–637. DOI: 10.1016/j.tust.2007.12.001.

13. Sokolov K. O. Frequency-time presentation of georadar profiles based on continuous wavelet transform. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2014, no. 2, pp. 77–81. [In Russ].

14. Shkuratnik V. L., Nikolenko P. V., Koshelev A. E. Spectral characteristics of acoustic emission in loaded coal specimens for failure prediction. *Journal of Mining Science*. 2017, vol. 53, no. 5, pp. 818–823. DOI: 10.1134/S1062739117052825.

15. Aggelis D. G., Shiotani T., Kasai K. Evaluation of grouting in tunnel lining using impact-echo. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2008, vol. 23, pp. 629–637. DOI: 10.1016/j.tust.2007.12.001.

16. Song K., Cho G. Bonding state evaluation of tunnel shotcrete applied on to hard rocks using the impact-echo method. *NDT&E International*. 2009, vol. 42, pp. 487–500. DOI: 10.1016/j.ndteint.2009.02.007.

17. Verma A. K., Soumi Chaki, Aurobinda Routray, Mohanty W. K., Mamata Jenamani. Quantification of sand fraction from seismic attributes using Neuro-Fuzzy approach. *Journal of Applied Geophysics*. 2014, vol. 111, pp. 141–155. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2014.10.005.

18. Denisov R. R., Kapustin V. V. Computerized georadar data processing. *Russian Geophysics*. 2010, no. 4, pp. 76–80. [In Russ].

19. Nabatov V. V., Voznesenskiy A. S. Georadar detection of voids at the soil-lining interface in subway tunnels. *Gornyi Zhurnal*. 2015, no. 2, pp. 15–20. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2015.02.03.

20. Nabatov V. V. Information entropy as an identifier in rock mass structure determination using low-frequency radars. *Journal of Mining Science*. 2017, vol. 53, no. 2, pp. 190–200. DOI: 10.1134/S1062739117022295.

21. Lu G., Zhao W., Forte E., Tian G., Li Y., Pipan M. Multi-frequency and multi-attribute GPR data fusion based on 2-D wavelet transform. *Measurement*. 2020, vol. 166, article 108243. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.108243

22. Liu Z., Li J., Liu Y., Liu C., Li C., Zhou D. Analyzing the behavior of GPR wave propagation in zinc contaminated soil combining the dielectric properties – experimental study. *Acta Geophysica*. 2021, vol. 69, pp. 483–495. DOI: 10.1007/s11600-021-00552-2.

23. Fan C., Zhi-Rong Z., Yun-Fei D., Yu B., Chang-Qing X., Xiao-Feng J. Correction of seismic attribute-based small-structure prediction errors using GPR data. A case study of the Shuguang Coal Mine, Shanxi. *Applied Geophysics*. 2020, vol. 17, no. 4, pp. 489–500. DOI: 10.1007/s11770-020-0841-7.

24. Andrianov S. V. GPR monitoring of space between lining and rock in underground mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 5, pp. 124–132. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-124-132.

25. Peng M., Wang D., Liu L., Shi Z., Shen J., Ma F. Recent advances in the GPR detection of grouting defects behind shield tunnel segments. *Remote Sensing*. 2021, vol. 13, no. 22, article 4596. DOI:10.3390/rs13224596.

26. Mapping voids, debonding, delaminations, moisture, and other defects behind or within tunnel linings. *TRB's second Strategic Highway Research Program (SHRP 2) Report S2-R06G-RR-1*. 2013, pp. 555. DOI: 10.17226/22609.

27. Vartanov A. Z., Kovpak I. V., Titov N. E. Geocontrolling for shielddriving of shal-low sewers. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2005, no. 7, pp. 87–92. [In Russ].

28. Eremenko A. V., Zverev E. O., Klepikova S. M., Monahov V. V. GPR survey in the presence of reinforced concrete structures. *Prospect and protection of mineral resources*. 2004, no. 12, pp. 26–28. [In Russ].

29. Kopeykin V. V. *Rasprostranenie elektromagnitnykh impul'sov v podzemnoy srede* [Propa-

gation of electromagnetic pulses in the underground environment], available at: <http://www.georadar.ru/articles/article5.php> (accessed 16.01.2022). [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Набатов Владимир Вячеславович*¹ — канд. техн. наук, доцент, e-mail: nv4@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-0047-0462,
*Уткина Александра Валерьевна*¹ — аспирант, e-mail: alex-av7@mail.ru,
¹ НИТУ «МИСиС».

Для контактов: Набатов В.В., e-mail: nv4@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*V.V. Nabatov*¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, e-mail: nv4@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-0047-0462,
*A.V. Utkina*¹, Graduate Student, e-mail: alex-av7@mail.ru,
¹ National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.
Corresponding author: V.V. Nabatov, e-mail: nv4@mail.ru.

Получена редакцией 19.01.2022; получена после рецензии 18.03.2022; принята к печати 10.05.2022.
Received by the editors 19.01.2022; received after the review 18.03.2022; accepted for printing 10.05.2022.



РУКОПИСИ, ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «ГОРНАЯ КНИГА»

ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ И ВНЕДРЕНИЕ ИХ В ОБЩУЮ СИСТЕМУ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ

(№ 1251/06-22 от 18.04.2022; 6 с.)

*Косарева-Володько Ольга Владимировна*¹ — канд. техн. наук, доцент, e-mail: kosareva-volodko@rambler.ru; *Альзалзали Набиль Надир Террад*¹ — магистр,
¹ ГИ НИТУ «МИСиС».

Спрос на энергию, в частности экологически чистую, растет. Одним из перспективных вариантов является солнечная тепловая электростанция (СТЭ). Моделирование СТЭ позволяет исследовать ее характеристики до начала строительства. Результаты моделирования могут быть применены для оптимизации тепловой схемы электростанции, разработки общей стратегии управления и определения процедуры запуска. Ирак, как государство, поддержавшее Киотский протокол, стремится развивать использование возобновляемых источников энергии и внедрять их в общую систему электроснабжения.

Ключевые слова: возобновляемые источники, солнечные батареи, электроэнергия, гибридная схема, электрическая система.

RENEWABLE ENERGY SOURCES AND THEIR INTRODUCTION INTO THE GENERAL ENERGY DISTRIBUTION SYSTEM

*O.V. Kosareva-Volod'ko*¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, e-mail: kosareva-volodko@rambler.ru,
*Alzalzali Nabil Gadir Terrad*¹, Magister,

¹ Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.

The demand for energy, in particular environmentally friendly, is growing. One of the promising options is a solar thermal power plant (STP). Modeling a STP allows you to explore its characteristics before construction begins. The results of the simulation can be successfully applied to optimize the thermal scheme of the power plant, develop an overall control strategy and determine the start-up procedure. Iraq, as a state that has supported the Kyoto Protocol, seeks to develop the use of renewable energy sources and introduce them into the general electricity supply system.

Key words: renewable sources, solar panels, electric power, hybrid scheme, electrical system.